POLITYKA ENERGETYCZNA
Tom 16 ✧ Zeszyt 4 ✧ 2013
ISSN 1429-6675

Marcin KOPCZYŃSKI*, Jarosław ZUWAŁA**

Toryfikacja biomasy drogą do eliminacji barier technologicznych wielkoskalowego jej współspalania

STRESZCZENIE. Prognozy pokazują, że światowa konsumpcja energii elektrycznej wzrośnie od 2007 do 2035 r. o 49% (International 2010). Dodatkowo narzucony przez Parlament Europejski udział energii elektrycznej wyprodukowanej w odnawialnych źródłach energii (OZE) z roku na rok wzrasta.

Szybki wzrost produkcji energii elektrycznej z OZE Polska zawdzięcza przede wszystkim rozwojowi technologii konwersji biomasy w krajowych obiektach energetycznych oraz elektrowniom wiatrowym. Jednakże głównym źródłem energii elektrycznej w OZE w Polsce w ostatnich latach jest energia chemiczna biomasy, z czego zdecydowaną większość wytworzono w procesach jej współspalania z paliwami kopalnymi (w 2011 roku około 80%) (URE 2012).

Wielkoskalowe wytwarzanie energii z biomasy stałej związane jest jednak z występowaniem pewnych ograniczeń technologicznych, które przyczyniły się nie tylko do rozwoju nowych rozwiązań technologicznych w energetyce, lecz także do rozwoju procesów jej wstępnego przygotowania przed energetycznym wykorzystaniem, tj. suszenie, kompaktowanie, czy toryfikacja.

Obiecującą metodą waloryzacji biomasy wydaje się być proces tzw. toryfikacji, w którym otrzymuje się produkt stały (tzw. toryfikat) o właściwościach fizykochemicznych, korzystniejszych w przypadku zastosowania go jako paliwa dla energetyki w porównaniu z biomasą surową. Toryfikat jest materiałem jednorodnym, charakteryzuje się przede wszystkim zwiększoną podatnością przemiałową i gęstością energetyczną, a jego właściwości fizykochemiczne zbliżone są bardziej do niskokalorycznych węgli niż do biomasy nieprzetworzonej (Bergman, Kiel 2005).

* Mgr inż., ** Dr hab. inż. – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu,
e-mail: mkopczyński@ichpw.zabrze.pl

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

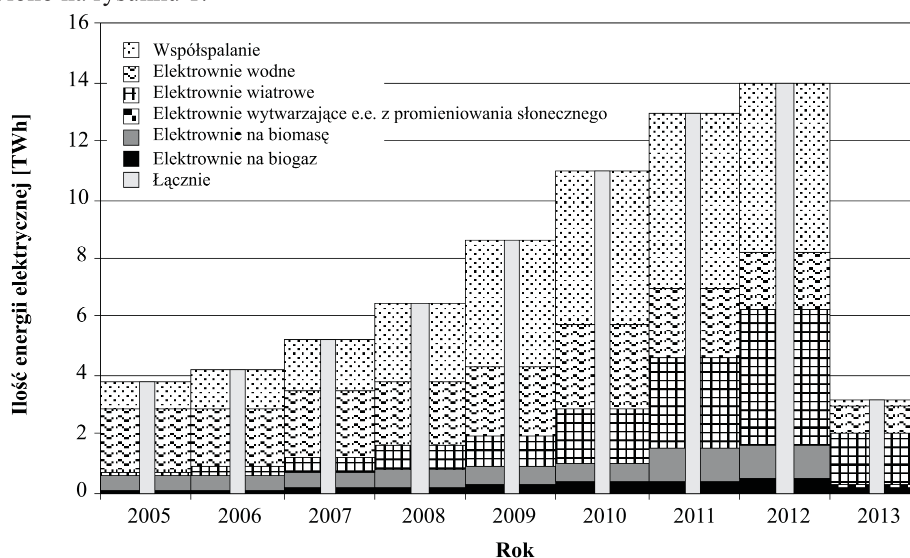
W artykule przedstawiono strukturę wykorzystania odnawialnych źródeł energii w krajowej energetyce, przedstawiono bariery technologiczne występujące w procesach współspalania biomasy z węglem oraz przedstawiono korzyści wynikające zastąpienia jej biomasą toryfikowaną.

SŁOWA KLUCZOWE: toryfikacja, biomasa, współspalanie, zapalność i wybuchowość pyłów

Wprowadzenie

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną (prognozy pokazują, że światowa konsumpcja energii elektrycznej wzrośnie od 2007 do 2035 r. o 49% (International 2010)), ograniczone zasoby paliw kopalnych oraz troska o środowisko przyczyniają się do rozwoju mało uciążliwych technologii pozyskiwania energii. Dodatkowo narzucony przez Parlament Europejski udział energii elektrycznej wyprodukowanej w odnawialnych źródłach energii (OZE) z roku na rok wzrasta, a docelowo w 2020 roku jej produkcja w Polsce ma osiągnąć próg 15% (Dyrektywa 2009). W związku z powyższym intensywnie rozwija się sektor tzw. energetyki odnawialnej wykorzystującej OZE, gdzie w zależności od ich dostępności wykorzystuje się energię wiatru, słońca, wody, geotermalną oraz energię chemiczną biomasy.

W Polsce wytwarzanie energii elektrycznej w OZE rozwija się dynamicznie, opierając się głównie na wykorzystaniu zasobów, takich jak: biomasa, biogaz, wiatr i woda (URE 2013). Ilość oraz strukturę produkcji energii elektrycznej wytworzonej w OZE w latach 2005–2013, potwierdzonej wydanymi przez URE świadectwami pochodzenia, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura produkcji energii elektrycznej w OZE w Polsce (2013 dane do lipca)

Fig. 1. Renewable electricity production structure in Poland (Jan–Jul 2013)

Pomimo dynamicznego rozwoju technologii bazujących na OZE (ilość energii elektrycznej wytworzonej w OZE w roku 2012 była ponad trzykrotnie wyższa w porównaniu z rokiem 2005) w dalszym ciągu udział węgla w całkowitej produkcji energii elektrycznej w Polsce jest wysoki w porównaniu do innych państw UE (w 2011 r. wynosił około 87%) (Kaliski 2012).

Jak można zaobserwować na rysunku 1 szybki wzrost produkcji energii elektrycznej w OZE Polska zawdzięcza przede wszystkim rozwojowi technologii konwersji biomasy w krajowych obiektach energetycznych oraz elektrowniom wiatrowym. Jednakże głównym źródłem energii elektrycznej w OZE w Polsce w ostatnich latach jest energia chemiczna biomasy, z czego zdecydowaną większość wytworzono w procesach jej współspalania z paliwami kopalnymi (w 2011 roku około 80%) (URE 2012). W głównej mierze za sprawą szybkiej implementacji procesu współspalania oraz stosunkowo niskich nakładach inwestycyjnych dzięki wykorzystaniu istniejących systemów przygotowania paliwa (Zuwała 2005).

1. Bariery procesu współspalania

Wielkoskalowe wytwarzanie energii z biomasy stałej związane jest jednak z występowaniem pewnych ograniczeń technologicznych, które potęgują się wraz ze wzrostem udziału biomasy w strumieniu paliwa podawanego do kotła. Mogą one, zwłaszcza w systemach bezpośredniego współspalania, negatywnie wpływać na funkcjonowanie instalacji, szczególnie przy wykorzystaniu biomasy o niskiej jakości. Właściwości fizykochemiczne biomasy powodują, że jest ona paliwem trudnym technologicznie, znacznie różniącym się od węgla spalanego w kotłach energetycznych zaprojektowanych na paliwa kopalne. Stosowanie surowej biomasy zawierającej duże ilości wilgoci, która stanowi balast oraz silnie obniża wartość kaloryczną paliwa na jednostkę objętości wymusza stosowanie dużych strumieni paliwa podawanego do kotła celem dostarczenia odpowiedniej ilości energii. Natomiast duża zawartość części palnych w biomasie w porównaniu z węglem zmienia warunki zapłonu i spalania mieszanki węgiel-biomasa w kotle (Zuwała 2005). Poza podstawowymi właściwościami fizykochemicznymi biomasa charakteryzuje się także odmiennym składem elementarnym w porównaniu z węglem. Zagrożenia dla wyposażenia kotłowego i pozakotłowego, będące konsekwencją procesu współspalania mogą wynikać ze stosunkowo wysokiej zawartości chloru w biomasie oraz odmiennego składu chemicznego popiołu w porównaniu z węglem.

W polskich elektrowniach i elektrociepłowniach biomasę powszechnie współspala się z węglem w kotłach pyłowych. Niestety, wąskim gardłem tej technologii jest układ przygotowania paliwa, czyli młyny węglowe, których konstrukcji nie przewidziano do mielenia mieszanki węgla i biomasy. Dlatego współmielenie biomasy ma ogromny wpływ na ich pracę i osiągane przez nie parametry, co z kolei przekłada się na pracę samego kotła (Dekarz 2012).

Przeprowadzone badania emisyjne podczas współspalania biomasy z węglem wykazały, że zawartość HCl w spalinach może być nawet dwukrotnie wyższa w porównaniu ze spalaniem samego węgla. Współspalanie biomasy (przy udziale 5–15% energii doprowadzonego paliwa) może powodować stężenia HCl w spalinach osiągające nawet 400 mg/m_{US}^3, podczas gdy podczas spalania samego węgla kamiennego osiągały wartość 30–150 mg/m_{US}^3. W konsekwencji współspalanie biomasy może prowadzić do utrudnień eksploatacyjnych wyposażenia kotłowego i pozakotłowego, w tym elektrofiltrów i instalacji odsiarczania spalin metodą mokrą. W przypadku obiektów wyposażonych w mokre instalacje odsiarczania spalin, w których następuje usuwanie HCl, uzyskuje się bardzo wysokie ilości rozpuszczalnej soli $CaCl_2$ w absorberze (na poziomie powyżej 40 g/l chlorków), co powoduje konieczność odprowadzania większej ilości ścieków. Duża zawartość HCl w spalinach może zmieniać wartości pH stosowanej zawiesiny, co w niektórych przypadkach powoduje obniżenie skuteczności odsiarczania spalin. Ponadto, współspalanie biomasy o wysokiej zawartości chloru może być jedną z głównych przyczyn powodujących wytrącanie się osadów zawierających higroskopijny $FeCl_2$. Wytrącanie się tych osadów w odkraplaczu absorbera wiąże się z koniecznością częstszego mycia odkraplacza (wzrasta zużycie energii elektrycznej i wody), zaś na układach pomiarowych powoduje problemy eksploatacyjne (Fulczyk, Głowacki 2010).

Jak wspomniano powyżej, wilgoć w biomasie stanowi balast, który przy jej pozyskaniu, składowaniu, transporcie, przeróbce i użytkowaniu stwarza wiele problemów. Zawartość wilgoci w biomasie ma wpływ na koszty jej pozyskiwania – wyższy ciężar wpływa na wzrost kosztów transportu. Ponadto duża zawartość wilgoci zawarta w biomasie przekłada się na niską gęstość energetyczną tego paliwa. Powoduje to konieczność dostarczenia dużych ilości biomasy do kotła dla zapewnienia odpowiedniego strumienia energii chemicznej. Paliwo dostarczone na teren jednostki wytwórczej jest przenoszone na składowisko, gdzie przechowuje się je do momentu wykorzystania. Jednakże długotrwałe przechowywanie biomasy na składowiskach otwartych, ze względu na zachodzące w niej procesy biologiczne powoduje, że ulega ona biodegradacji, co prowadzi do wzrostu mikroorganizmów (szczególnie intensywnie namnażają się bakterie mezofilne, promieniowce oraz grzyby pleśniowe) (Sebastian i in. 2006). Może to stanowić zagrożenie dla zdrowia człowieka ze względu na pył organiczny powstający podczas przetwarzania i wykorzystywania biomasy, zawierający wspomniane mikroorganizmy. Unoszony w otoczeniu pracy i następnie wdychany przez obsługę może wywierać niekorzystny wpływ na organizm człowieka poprzez działanie toksyczne, drażniące i alergizujące (Dutkiewicz 1997).

Mówiąc o potencjalnych zagrożeniach dla zdrowia i życia obsługi instalacji, w których prowadzi się proces współspalania z całą pewnością nie można zapomnieć o właściwościach wybuchowo-pożarowych biomasy. Po wypadku śmiertelnym, który miał miejsce dnia 24 stycznia 2010 w jednej z krajowych elektrowni realizujących proces współspalania, inspektorzy Państwowej Inspekcji Pracy wydali raport, w którym zwrócono uwagę na fakt, że „przy spalaniu węgla i biomasy wzrasta ryzyko wystąpienia wybuchu w związku ze zwiększoną skłonnością do samozapłonu biomasy” (Kowalewska 2010).

Potencjalne zagrożenia pożarowe wynikające z faktu wprowadzenia do współspalania w obiekcie energetycznym nowego paliwa o odmiennych właściwościach fizykochemicz-

nych, można podzielić na poszczególne operacje jednostkowe składające się na proces spalania (współspalania) w następujący sposób: składowanie, przygotowanie (mielenie) i transport.

Ze względu na zachodzące w biomasie roślinnej procesy biologiczne oraz niebezpieczeństwo samozapalenia nie zaleca się składowania rozdrobnionej biomasy dłużej niż 2–3 dni (Golec 2004).

Ze współmieleniem węgla z podwyższonym udziałem biomasy związane są z kolei dwa rodzaje zagrożeń: wystąpienie gazowych związków palnych oraz zapalność i wybuchowość pyłów. Biomasa charakteryzuje się niższymi temperaturami rozkładu w porównaniu z węglem i już w temperaturze około 190°C może dochodzić do jej termicznej destrukcji, czemu towarzyszy wydzielanie się palnych gazów tj.: CO, CH_4. (Zuwała i in 2010). Współspalanie w kotłach pyłowych realizowane jest najczęściej poprzez podanie mieszanki pyłu biomasy i węgla, która przygotowywana jest w procesie współmielenia w młynie węglowym. Do układu młynowego podaje się powietrze transportujaco-suszące, które w skrajnych przypadkach może mieć temperaturę nawet około 300°C. W związku z powyższym w młynie lokalnie mogą zachodzić procesy pirolizy lub zgazowania zalegającej biomasy, w wyniku których dochodzić może do wytworzenia palnych związków gazowych, stwarzających zagrożenia pożarowo-wybuchowe (Kopczyński i in. 2011). Większość pyłów paliw stosowanych do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła charakteryzuje minimalna temperatura zapłonu w warstwie w zakresie 230–480°C (dla biomas używanych w Polsce zwykle około 80°C) (Jobczyk 2010).

Zasygnalizowane powyżej ograniczenia związane ze współspalaniem przyczyniły się nie tylko do rozwoju nowych rozwiązań technologicznych w energetyce, jak na przykład dedykowane dla biomasy instalacje młynowe i palnikowe, lecz także do rozwoju procesów jej wstępnego przygotowania (waloryzacji) przed energetycznym wykorzystaniem, tj. suszenie, kompaktowanie, czy toryfikacja. Procesy kompaktowania biomasy do postaci tzw. paliw formowanych (peletów czy brykietów) i suszenia, za sprawą redukcji zawartości wilgoci w biomasie, wpływają w zasadzie wyłącznie na wzrost gęstości energetycznej i jednocześnie kumulacji energii chemicznej biomasy.

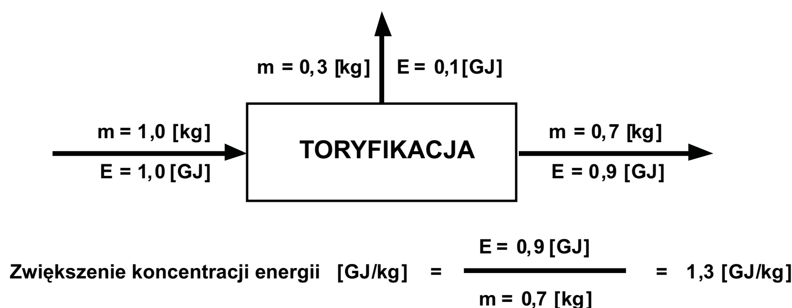
2. Toryfikacja biomasy

Obiecującą metodą waloryzacji biomasy wydaje się być proces tzw. toryfikacji (z ang. *torrefaction*, tzn. prażenie). Idea toryfikacji nie jest nowa, znana jest od przeszło 70 lat i pochodzi od procesu suszenia i prażenia ziaren kawy. W literaturze napotyka się na inne określenia tego procesu, najczęstsze z nich to: prażenie, powolna i łagodna piroliza oraz wysokotemperaturowe suszenie. Badania toryfikacji biomasy – jako procesu jej wstępnego przygotowania do celów energetycznych – zintensyfikowały się w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, prawdopodobnie za sprawą rozwoju technologii współspalania i pojawiających się opisanych powyżej problemów technologicznych.

Toryfikacja to proces prowadzony przy ciśnieniu atmosferycznym, który polega na termicznej przeróbce biomasy w środowisku inertnym (brak utleniacza). Według różnych źródeł w zakresie temperatury od 200 do 320°C i czasie trwania procesu zależnym od typu reaktora i rodzaju surowca dochodzi do degradacji hemicelulozy wchodzącej w skład biomasy. W następstwie otrzymuje się produkt stały (tzw. toryfikat) oraz produkty lotne (ciekłe i gazowe). Biomasa poddana procesowi toryfikacji zyskuje nowe właściwości fizykochemiczne, korzystniejsze w przypadku zastosowania jej jako paliwa dla energetyki. W porównaniu do biomasy surowej toryfikat jest materiałem jednorodnym, charakteryzuje się przede wszystkim zwiększoną podatnością przemiałową i gęstością energetyczną, a jego właściwości fizykochemiczne zbliżone są bardziej do niskokalorycznych węgli niż do biomasy nieprzetworzonej (Bergman, Kiel 2005).

Proces toryfikacji może być zastosowany do wstępnego uszlachetniania biomasy przed ich zastosowaniem w procesach współspalania, głównie metodą współspalania bezpośredniego poprzez węzeł mielenia i podanie mieszanki pyłowej do palników kotła. Biomasa toryfikowana może stanowić atrakcyjne paliwo nowej generacji dla zastosowań w procesach współspalania z węglem, a jej właściwości fizykochemiczne powodują, że jej udział masowy w mieszance węgiel-biomasa może być wyższy niż udział biomasy nieprzetworzonej w takiej mieszance. Warunkiem jednakże uzyskania korzystnych właściwości biomasy przetworzonej w połączeniu z wysoką wydajnością produktu stałego jest dobór optymalnego reżimu temperaturowego procesu toryfikacji (Kopczyński 2012).

W typowym procesie toryfikacji biomasy następuje zarówno ubytek masy, jak i energii chemicznej surowca. Biorąc jednakże pod uwagę stosunek masy do energii obserwuje się zwiększenie koncentracji energii chemicznej paliwa (Kopczyński, Zuwała 2012), co graficznie przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowy rozdział masy i energii w typowym procesie toryfikacji biomasy (Kopczyński, Zuwała 2012)

Fig. 2. Mass and energy distribution in a typical torrefied biomass process (Kopczyński, Zuwała 2012)

3. Właściwości fizykochemiczne biomasy toryfikowanej

Według wielu źródeł literaturowych biomasa toryfikowana może stanowić atrakcyjne paliwo, jako substytut biomasy w jednostkach prowadzących proces współspalania, zwłaszcza w obiektach realizujących proces bezpośredniego współspalania podając do kotła mieszankę pyłu węgla i biomasy przygotowaną w istniejących (węglowych) układach przygotowania paliwa tj. średnio bieżne młyny pierścieniowo-kulowe czy szybkobieżne młyny wentylatorowe. Wykorzystanie toryfikatu w takich jednostkach może pozwolić na zminimalizowanie lub całkowite wyeliminowanie negatywnych oddziaływań biomasy. Poniżej przedstawiono ocenę właściwości biomasy toryfikowanej dla zastosowań w energetyce, którą oparto na wybranych doświadczeniach własnych w obszarze toryfikacji biomasy oraz porównawczych danych literaturowych.

W procesie toryfikacji biomasa praktycznie całkowicie traci wilgoć, dzięki czemu pozbywa się balastu i obniżają się koszty jej transportu. Na obniżenie kosztów transportu wpływa także koncentracja energii chemicznej biomasy na jednostkę objętości. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań podstawowych właściwości fizykochemicznych przeprowadzonych dla biomasy drzewnej, którą poddano różnym procesom przeróbki. Biomasę poddano procesowi peletyzacji, toryfikacji oraz wykonano peletyzację toryfikowanej biomasy. Wyniki badań wskazują, że każdy z procesów podwyższa ciepło spalania biomasy, a wzrost gęstości energii nastąpił w przypadku peletyzacji oraz toryfikacji połączonej z peletyzacją. W przypadku poddania biomasy surowej procesowi peletyzacji uzyskano dwukrotny, a przypadku peletyzacji biomasy toryfikowanej trzykrotny wzrost gęstości energii (Witt i in. 2012). Można w związku z tym stwierdzić, że koszty transportu biomasy poddanej procesowi toryfikacji i następnie peletyzacji będą zdecydowanie niższe niż dla biomasy nieprzetworzonej, a także peletyzowanej.

Bergman i inni otrzymali pelety z biomasy toryfikowanej według metody TOP Pellets, które charakteryzowały się wartością gęstości energii w zakresie 14,0–15,5 GJ/m^3 zbliżoną

TABELA 1. Właściwości fizykochemiczne biomasy nieprzetworzonej i poddanej procesom kompaktowania i toryfikacji

TABLE 1. Physical and chemical properties of biomass, pellets and torrefied biomas

Wyszczególnienie	Biomasa drzewna	Toryfikowana biomasa drzewna	Pelety drzewne	Pelety z biomasy toryfikowanej
Wilgoć [%]	35	0	10	3
Ciepło spalania [MJ/kg]	10,5	20,4	15,6	16,9
Gęstość usypowa [kg/m^3]	475	230	650	750
Gęstość energii [GJ/m^3]	5,0	4,7	10,1	14,9

Źródło: Witt i in. 2012

jak dla węgli kamiennych o niskim stopniu metamorfizmu, dla których gęstość energii waha się w zakresie 16–17 GJ/m^3. Nadmienić należy, że gęstość energii dla peletów otrzymanych z tej samej biomasy lecz nieprzetworzonej w procesie toryfikacji wahała się w zakresie 7,8–10,5 GJ/m^3 (Bergman 2005).

Badania własne toryfikacji biomasy dla różnych rodzajów biomasy wykazały, że właściwości fizykochemiczne toryfikatu uzależnione są od warunków prowadzenia procesu, w głównej mierze od temperatury. Stwierdzono m.in., że wraz ze wzrostem temperatury procesu wzrasta wartość opałowa otrzymywanej biomasy toryfikowanej. Wytłoki z oliwek o wartości opałowej (w stanie analitycznym) Q_i^a równej 17 MJ/kg poddane procesowi toryfikacji w złożu stacjonarnym w temperaturze w zakresie 220–340°C charakteryzowały się stopniowym wzrostem wartości opałowej z zakresu 19–25 MJ/kg. Dla wierzby energetycznej stwierdzono identyczną zależność. Toryfikat z wierzby energetycznej nieprzetworzonej o wartości opałowej Q_i^a równej 17 MJ/kg otrzymany w temperaturze 220–340°C miał wartość opałową w zakresie około 18–22 MJ/kg.

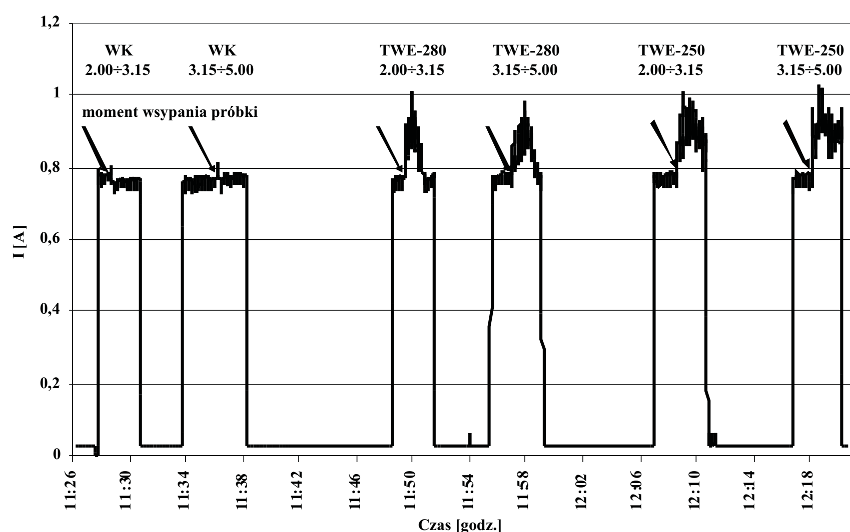
Wspomniano, że podczas składowania biomasa ulega biodegradacji, skutkiem czego wzrasta zagrożenie dla obsługi związane z tworzącymi się mikroorganizmami. Zdaniem autorów badających proces toryfikacji biomasy otrzymane nowe paliwo – biomasa toryfikowana – jest materiałem jednorodnym, charakteryzującym się właściwościami hyrofobowymi i zwiększoną odpornością na czynniki biologiczne w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną (Bergman 2005; Bridgeman i in. 2008). W związku z powyższym założyć można, że procesy biologiczne nie bedą zachodzić w przypadku składowania biomasy toryfikowanej. Dodatkowo wzrost energii chemicznej toryfikatów na jednostkę objętości w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną wpłynie na ilość magazynowanej biomasy. Z uwagi na mniejsze zapotrzebowanie biomasy toryfikowanej dla zapewnienia odpowiedniej ilości energii chemicznej w paliwie podanym do kotła zminimalizuje konieczność składowania dużych ilości biomasy, a także czas jej składowania. Dlatego też składowanie biomasy toryfikowanej w mniejszym stopniu będzie stanowić zagrożenie biologiczne dla obsługi.

Wspomniany negatywny wpływ obecności dużych ilości chloru w biomasie surowej na emisję HCl w procesie współspalania z węglem może być zminimalizowany w przypadku zastosowania niektórych rodzajów biomasy toryfikowanej. Badania własne toryfikacji przeprowadzone dla wierzby energetycznej w złożu stacjonarnym wykazały, że poprzez jej toryfikację możliwa jest redukcja zawartości chloru w biomasie. Zawartość chloru w wierzbie energetycznej poddanej toryfikacji w temperaturze 240°C uległa zmniejszeniu o połowę, z pierwotnej 0,035 do 0,018%. Dalszy wzrost temperatury toryfikacji powodował wzrost redukcji chloru w otrzymywanych toryfikatach. Wzrost temperatury toryfikacji o 20°C spowodował redukcję zawartości chloru do poziomu 0,005%, przy czym stwierdzono, że dalszy wzrost temperatury nie powoduje już redukcji zawartości chloru w toryfikowanej wierzbie energetycznej.

W procesie współspalania bezpośredniego głównymi ograniczeniami stosowania większych niż około 15% masowo ilości biomasy w mieszance z węglem jest jej niska zdolność przemiałowa i gęstość energii. Jak wykazały badania, wartość opałowa toryfikatów wzrasta razem ze wzrostem temperatury toryfikacji, jednocześnie otrzymane toryfikaty charakteryzują się większą zdolnością przemiałową w stosunku do biomasy nieprzetworzonej

(Phanphanich, Mani 2011). Podobnie, jak w przypadku gęstości energii, również zdolność przemiałowa toryfikatów wzrasta wraz ze wzrostem temperatury toryfikacji. Podczas mielenia toryfikatów otrzymanych w wyższych temperaturach otrzymuje się więcej frakcji drobnych, szczególnie ziaren o rozmiarze poniżej 0,2 mm. Ta korzystna cecha biomasy toryfikowanej, w przypadku współmielenia biomasy i węgla w młynie węglowym, pozwolić może na zwiększenie udziału masowego biomasy w strumieniu mieszanki paliwa kierowanego do palników pyłowych. Doskonałe właściwości przemiałowe toryfikatów, zbliżone do węgli energetycznych, prawdobodobnie wpłyną także na wydłużenie okresu pomiędzy kolejnymi remontami młynów w porównaniu do stosowania biomasy nieprzetworzonej (Kopczyński, Zuwała 2012).

Przeprowadzone badania mielenia próbek węgla kamiennego (WK) oraz toryfikatów z wierzby energetycznej otrzymanych w reaktorze ze złożem stacjonarnym w temperaturze 250°C (TWE-250) i 280 °C (TWE-280) wykazały, że wzrost temperatury toryfikacji zwiększał kruchość materiału. Badania dotyczące podatności przemiałowej wykonano według specjalnie dla tego celu opracowanej metodyki własnej, umożliwiającej określenie względnej podatności przemiałowej. Metoda ta polegała na mieleniu w laboratoryjnym młynku rozcierającym próbki o masie 2 gramów o ujednoliconym rozmiarze ziaren w czasie 120 s, a następnie wykonaniu analizy sitowej. Podczas mielenia rejestrowano pobór prądu przez młynek *I* [A], którego zmierzone wartości przedstawiono na rysunku 3. Można zaważyć, że po wsypaniu próbki węgla (oznaczono strzałką na wykresie) następuje chwilowy wzrost poboru prądu, który szybko wraca do stanu przed wsypaniem próbki. W przypadku toryfikatów otrzymanych w wyższej temperaturze (280°C) po około minucie od wsypania próbki, ilość pobieranego prądu wraca do stanu pierwotnego, natomiast w przypadku



Rys. 3. Pobór prądu I [A] przez laboratoryjny młynek w trakcie mielenia węgla i biomasy toryfikowanej (strzałką oznaczono moment wsypania próbki)

Fig. 3. Power consumption I [A] by a laboratory mill during grinding of coal and torrefied biomass (arrow indicates the moment of pouring the sample)

toryfikatów otrzymanych w temperaturze 250°C ilość pobieranego prądu maleje, jednakże nie wraca do stanu pierwotnego. Analiza składu ziarnowego próbek toryfikatu wykazała większy udział frakcji drobnych w przypadku mielenia wierzby energetycznej toryfikowanej w 280°C.

Dla oceny parametrów zapalności i wybuchowości pyłów biomasy toryfikowanej wybrano trzy rodzaje tzw. biowęgla, który został wytworzony w instalacji przemysłowej z następujących rodzajów biomasy surowej: zrębki wierzby energetycznej, zrębki drzew iglastych oraz pestki palmy olejowca gwinejskiego (tzw. PKS). Dla porównania przedstawiono też parametry zapalności pyłu z trocin drzewnych, wytłoków z oliwek oraz węgla kamiennego. Badania wybuchowości i zapalności pyłów przeprowadzono w Laboratorium Kopalni Doświadczalnej Barbara GIG, wyniki zestawiono w tabeli 2.

Wyniki badań wybuchowości i zapalności pyłu, mogą posłużyć do przeprowadzenia oceny zagrożenia wybuchem i pożarem w pomieszczeniach i instalacjach, w których pyły te występują, oraz do sprecyzowania wymagań dotyczących zastosowania urządzeń i systemów ochronnych.

TABELA 2. Parametry wybuchowości i zapalności pyłów wybranych paliw stałych

TABLE 2. Explosion and flammability parameters of dust of selected solid fuels

Parametr	Jedn.	Badane paliwo					
		pył węglowy	pył drzewny	pył biowęgla z biomasy drzewnej	pył wytłoków z oliwek	pył biowęgla z łuski olejowca	pył biowęgla z wierzby energet.
Maksymalne ciśnienie wybuchu, p_{max}	bar	7,2	7,5	7,6	7,1	7,4	8
Maksymalna szybkość narastania ciśnienia, $^{dp}/_{dt}$	bar/s	237	195	369	226	313	405
Wskaźnik wybuchowości, $K_{st\ max}$	mbar/s	64	53	100	61	85	110
Dolna granica wybuchowości, DWG	g/m^3	60	150	60	125	60	60
Temperatura zapłonu obłoku pyłu, TCL	°C	750	460	475	560	495	490
Temperatura zapłonu warstwy pyłu, $T_{5\ mm}$	°C	>400	340	300	270	270	320
Minimalna energia zapłonu obłoku pyłu, MIE	mJ	>74 000	<2,9	>1 000	>1 000	300–1 000	>1 000
Graniczne dla wybuchu stężenie tlenu, GST	%	10	13	10	12	10	11

Na podstawie zestawionych w tabeli 2 wyników badań można stwierdzić, że pyły biomasy toryfikowanej charakteryzują się wysokim maksymalnym ciśnieniem i dość wysoką dynamiką wybuchu. Wartość wskaźnika wybuchowości $K_{st\ max}$ wskazuje, że pyły te należy zaliczyć do klasy zagrożenia wybuchowego *St1*. Wartość minimalnej energii zapłonu obłoku pyłu biowęgla z łuski olejowca wskazuje, że badany pył może zostać zapalony nawet przez źródła o niewielkiej energii, np. przez wyładowania elektrostatyczne iskrowe. Wysoka dla próbek biowęgla z drzewa iglastego i biowęgla z wierzby energetycznej wartość minimalnej energii zapłonu oznacza, że pyły te są trudno zapalne; nie rozstrzyga to jednak o braku zagrożenia wybuchem. Porównując parametry zapalności i wybuchowości badanych biowęgli z reprezentatywnymi rodzajami biomasy można stwierdzić, że biomasa toryfikowana nie powinna stanowić większego zagrożenia pożarowo-wybuchowego w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną.

Podsumowanie

Na podstawie wyników badań własnych oraz porównawczych danych literaturowych stwierdzono, że biomasa toryfikowana może stanowić substytut biomasy nieprzetworzonej jako paliwa dla energetyki.

Poczynając od transportu i magazynowania, poprzez przygotowanie i podanie do kotła, a na emisji w procesie spalania kończąc, biomasa toryfikowana charakteryzuje się właściwościami korzystniejszymi w porównaniu do biomasy surowej. Kilkukrotnie wyższa energia chemiczna toryfikatu na jednostkę objętości tzw. gęstość energii wpłynie na obniżenie kosztów transportu w porównaniu z biomasą surową. Większy strumień energii przy tej samej objętości paliwa podawanego do kotła pozwoli także na zwiększenie udziału masowego biomasy w procesach współspalania i tym samym ułatwi producentom „zielonej" energii na dotrzymanie narzuconych przez Parlament Polski i Europejski udziałów energii wyprodukowanej w OZE.

Dzięki zwiększonej odporności na czynniki atmosferyczne i biologiczne toryfikatu oraz jego hydrofobowy charakter możliwe jest magazynowanie większych ilości paliwa w porównaniu z biomasą surową. Pozwoli na zapewnienie większych rezerw paliwowych jednostkom wytwórczym. Ze względu na zwiększoną odporność biologiczną obsługa będzie mniej narażona na oddziaływanie mikroorganizmów i choroby im towarzyszące w porównaniu ze stosowaniem biomasy.

Duża koncentracja energii oraz doskonałe właściwości przemiałowe pozwolą na zmniejszenie zużycia zarówno energii podczas mielenia paliwa w młynach, jak również elementów samego młyna. Będzie to miało bezpośredni wpływ na wydłużenie czasu pomiędzy remontami młynów, w których z węglem zamiast biomasy zastosuje się biomasę toryfikowaną.

Mniejsza zawartość substancji szkodliwych w biomasie toryfikowanej, np. wspomniany chlor i związana z tym mniejsza emisja HCl podczas spalania pozwoli na zminimalizowanie negatywnych oddziaływań podczas spalania biomasy nieprzetworzonej.

Reasumując można przyjąć, że proces toryfikacji z powodzeniem może być użyty do wstępnego uszlachetniania biomasy przed jej zastosowaniem w procesach współspalania, szczególnie metodą bezpośrednią w instalacjach wyposażonych w konwencjonalne układy mielące. Niestety, jedną z najważniejszych barier dla upowszechnienia stosowania biomasy toryfikowanej w polskiej energetyce w istniejących elektrowniach i elektrociepłowniach jest jej formalny status – obecnie Urząd Regulacji Energetyki nie uznaje biomasy toryfikowanej jako źródła energii odnawialnej. Z tego względu producenci „zielonej" energii poza korzystnym wpływem stosowania toryfikatu na operację jednostkowe nie mają innych korzyści, tj. uzyskanie świadectw pochodzenia wynikających ze stosowania odnawialnych źródeł energii.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych" bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO_2 ze spalin

Literatura

BERGMAN P.C.A., KIEL J.H.A., 2005 – Torrefaction for biomass upgrading. ECN publication, Report ECN-RX-05-180, 2005, http://www.ecn.nl

BERGMAN P.C.A., 2005 – Combined torrefaction and pelletisation – The TOP process. ECN publication, Report ECN-C-05-073, http://www.ecn.nl

BRIDGEMAN i in. 2008 – BRIDGEMAN T.G., JONES J.M., SHIELD I., WILLIAMS P.T., 2008 – Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. Fuel, 87, 844–856.

COCKER-MACIEJEWSKA A., 2007 – Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych t. 30, 133–141.

DEKARZ D., 2012 – Jakość pracy instalacji młynowej a parametry pracy kotła. Energetyka Cieplna i Zawodowa, t. 6, 20–25.

DUTKIEWICZ J., 1997 – Bacteria and fungi in organic dust as potential health hazard. Annals of Agricultural and Environmental Medicine 4, 11–60.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego I Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r.

FULCZYK F., GŁOWACKI E., 2010 – Problemy eksploatacyjne elektrofiltrów i instalacji odsiarczania spalin związane ze współspalaniem biomasy. Energetyka nr 6 (672), 379–384.

GOLEC T., 2004 – Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych, Energetyka nr 7/8, 437–445.

International Energy Outlook 2010 – Highlights, U.S. Energy Information Administration.

JOBCZYK T., 2010 – Instalacje biomasy a zagrożenie wybuchem. Powder & Bulk, t. 2.

KALISKI i in. 2012 – KALISKI M., SZURLEJ A., GRUDZIŃSKI Z., 2012 – Węgiel i gaz ziemny w produkcji energii elektrycznej Polski i UE. Polityka Energetyczna t. 15, z. 4, 201–213.

KOPCZYŃSKI 2011 – KOPCZYŃSKI M., GŁÓD K., ZUWAŁA J., 2011 – Analiza potencjalnych zagrożeń pożarowych podczas współmielenia biomasy i węgla dla procesów ich bezpośredniego współspalania. Chemik t. 65, nr 6, 580–589.

Kopczyński M., Zuwała J., 2012 – Biomasa toryfikowana – nowe paliwo dla energetyki. Chemik t. 6, 540–551.

Kopczyński M., 2012 – Toryfikacja wierzby energetycznej. Energetyka Cieplna i Zawodowa t. 2, 39–42.

Kowalewska J., 2010 – Kto odpowiada za tamten wybuch? Gazeta Wyborcza, 2010-08-17.

Phanphanich M., Mani S., 2011 – Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. Bioresource Technology t. 102, 1246–1253.

Sebastian i in. 2006 – Sebastian A., Madsen A.M., Märtensson L., Pomorska D., Larsson L., 2006 – Assessment of microbial exposure risks from handling of biofuel wood chips and straw – effect of outdoor storage. Annals of Agricultural and Environmental Medicine 13, 139–45.

URE, 2012 – Biuletyn Urzędu Regulacji Energetyki nr 2 (80) (http://www.ure.gov.pl).

URE, 2013 – Biuletyn Urzędu Regulacji Energetyki (http://www.ure.gov.pl).

Zuwała J., Hrycko P., 2005 – Analiza efektów energetycznych i ekologicznych procesu współspalania węgla i biomasy w kotle pyłowym OP-230. Polityka Energetyczna t. 8, z. spec., Wyd. IGSMiE PAN.

Zuwała i in. 2010 – Zuwała J., Topolnicka T., Głód K., Kopczyński M., 2010 – Zastosowanie technik sprzężonych TGA-MS oraz m-GC do analizy przebiegu procesów termicznego rozkładu mieszanek węgla i biomasy. Przemysł Chemiczny t. 89, nr 6, s. 812–816.

Witt i in. 2012 – Witt J., Bienert K., Schaubach K., 2012 – Production of pellets from torrefied wood and introduction to SECTOR project. BalBic Project Kick-Off-Workshop, 23th March 2012 Salaspils at LSFRI Silava library (www.dbfz.de).

Marcin Kopczyński, Jarosław Zuwała

Biomass torrefaction as a way for elimination of technical barriers existing in large-scale co-combustion

Abstract

According to the prognosis, world's energy consumption will increase by 49% (from 2007 to 2035, International 2010). Additionally, the obligatory share of electricity coming from renewable energy sources (RES) increases annually.

Rapid growth of RES electricity production in Poland could be achieved mostly due to the dynamic development of biomass combustion and co-firing in domestic utilities and to the wind energy. Concerning biomass based electricity, the most of it was generated in the processes of co-firing with fossil fuels (80% of the total RES based electricity was coming from biomass cofiring in 2011, URE 2012). However large scale biomass based electricity bound with several technological barriers which enhanced the development of not only new technologies but also come-back to the implementation of its pre-processing processes, such as drying, compacting or torrefaction.

The promising method of solid biomass valorization can be torrefaction, which leads to the achievement of solid fuel, which physicochemical properties are more favorable as to be used as a fuel in coal-dedicated installations. Torrified biomass has a homogenous structure, better milling performance comparing to raqw biomass, has a higher energy density. All these features make a torrified biomass more like a coal than a biomass (Bergman, Kiel 2005).

The paper presents the barriers of raw biomass use for energy production in Poland, torrefaction process itself and indicates the advantages of use torrified biomass for energy production in the existing coal fired utilities.

KEY WORDS: torrefaction, biomass, co-firing, flammability and explosiveness of dusts